



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ

PRODUCTION TECHNOLOGY OF SPUR GEARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš KOSÍŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Kosíř

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie výroby čelního ozubení

v anglickém jazyce:

Production technology of spur gears

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Rozdělení čelního ozubení.
3. Základní technologie a metody výroby čelního ozubení.
4. Moderní metody výroby čelního ozubení - stroje, nástroje, řezné podmínky.
5. Závěr - porovnání s ostatními metodami a doporučení pro praxi.

Cíle bakalářské práce:

Studie zaměřená na moderní technologie a metody výroby čelních ozubených kol. Porovnání jednotlivých metod a vyhodnocení s doporučením pro praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X
2. KRÍŽ, R. Strojnické tabulky II. Pohony. 1. vyd. Ostrava: MONTANEX, a.s. 1997. 213 s. ISBN 80-85780-51-8
3. RICHARD, A. Ferigungstechnik 1. 10. Auflage. Hamburg: Verlag Handwerk und Technik G.m.B.H. 1993. 420 s. ISBN 3.582.02311.7
4. KÖNIG, W. Fertigungsverfahren Band 1, 2, 3. 4. Afl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1990. 416. s. ISBN 3-18-401054-6
5. SPEYER, K.H. CNC - Wälzfräsen. 2. Aufl. Ludwigsburg: Hermann Pfauter GmbH. 1992. 70. s. ISBN 3-478-93019-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 9.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje a porovnává technologie výroby a dokončování čelního ozubení. Každá popsaná technologie obsahuje použité nástroje, stroje a řezné podmínky. Na závěr jsou technologie porovnány podle vhodnosti použití.

Klíčová slova

Ozubené kolo, čelní ozubení, stroj, nástroj, obrobek, technologie

ABSTRACT

This bachelor thesis describes production and finishing technologies of spur gear. Each described technology contains used tools, machinery and cutting conditions. Technologies are compared by suitability using in conclusion.

Keywords

Gear, spur gear, machine, tool, workpiece, technology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOSÍŘ, Tomáš. *Technologie výroby čelního ozubení*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 47 s. Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie výroby čelního ozubení** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Tomáš Kosíř

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl srdečně poděkovat rodině za podporu při studiu.

OBSAH

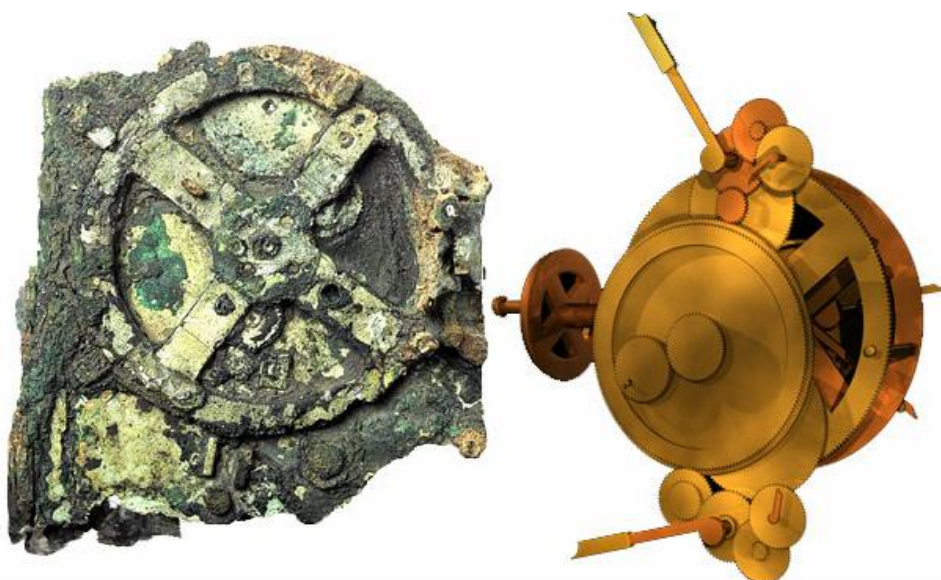
ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD.....	9
1 DRUHY OZUBENÍ A SOUKOLÍ	10
1.1 Geometrie profilu zubu:	10
1.2 Rozdělení ozubených kol podle vzájemné polohy os	11
1.2.1 Čelní (válcová) soukolí	11
1.2.2 Kuželová soukolí	11
1.2.3 Šroubová soukolí	12
1.2.4 Šneková soukolí.....	13
2 ČELNÍ OZUBENÍ	15
2.1 Rozdělení podle tvaru ozubení.....	15
2.1.1 Čelní ozubená kola s přímými zuby	15
2.1.2 Čelní ozubená kola se šikmými zuby	15
2.1.3 Čelní ozubená kola se šípovými zuby	16
2.1.4 Čelní ozubená kola s křivkovými zuby (kruhové oblouky)	16
2.1.5 Čelní ozubená kola s vnitřním ozubením	17
2.2 Základní geometrické parametry čelního ozubení	17
2.3 Korekce ozubení.....	18
2.4 Materiály ozubených kol	19
2.4.1 Litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem	19
2.4.2 Oceli.....	20
2.4.3 Plastické hmoty	20
2.4.4 Mosazi a bronzy	20
2.4.5 Slinuté kovy.....	20
3 TECHNOLOGIE VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ	21
3.1 Frézování dělicím způsobem.....	21
3.2 Frézování odvalovacím způsobem	22
3.3 Odvalovací obrázení čelních ozubených kol.....	24
3.3.1 Odvalovací obrázení hřebenovým obrážecím nožem (MAAG).....	25
3.3.2 Odvalovací obrázení kotoučovým obrážecím nožem (FELLOWS).....	26
3.4 Protahování	28

4	TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ ČELNÍHO OZUBENÍ	30
4.1	Ševingování	30
4.2	Broušení	32
4.2.1	Broušení dělícím způsobem tvarovými kotouči	32
4.2.2	Broušení dělícím způsobem s odvalem boku zubu	33
4.2.3	Broušení odvalovacím způsobem	35
4.2.4	Broušení do plna	36
4.2.5	Stroje pro broušení	36
4.3	Lapování	36
4.4	Kontrola rozměrů ozubených kol	37
4.4.1	Kontrolní rozměr přes zuby kola	37
4.4.2	Kontrolní rozměr zubů v konstantní tloušťce a výšce	38
4.4.3	Kontrolní rozměr zubů přes válečky	39
4.5	Univerzální stroje na kontrolu ozubení	40
4.6	Dosahované výsledky	40
	ZÁVĚR	42
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	46

ÚVOD

Ozubené kolo je tvarově složitá součást, která při záběru s druhým menším kolem (pastorkem) vytváří soukolí. Dvě nebo více spolu zabírajících kol tvoří ozubený převod, který je nejrozšířenějším převodovým mechanismem, s nímž přicházíme do styku každý den našeho života, ať vědomě, či nevědomě. Slouží k přenosu krouticího momentu a rotačního pohybu z jednoho hřídele na druhý bez prokluzu. V případě záběru ozubeného kola s hřebenem se převádí rotační pohyb na posuvný a opačně. Ozubené převody můžeme najít v automobilech, letadlech, hodinkách, výpočetní technice a na mnoha dalších místech.

Historie ozubených kol sahá až do starověku, kde kola nepředstavovala jen základní poháněcí síly různých jednoduchých mechanismů, ale i složitých, jako je Antikythera (obr. 1). Tento mechanismus obsahující zhruba 20 ozubených kol včetně diferenciálního převodu, byl nalezen na palubě řecké lodi, potopené kolem roku 80 př. n. l. Sloužil k předpovídání polohy hvězd, planet i zatmění slunce a měsíce. Ozubená kola se tedy staly již od starověku nepostradatelnou součástí mnoha mechanismů a do současnosti si prošly obrovským vývojem.



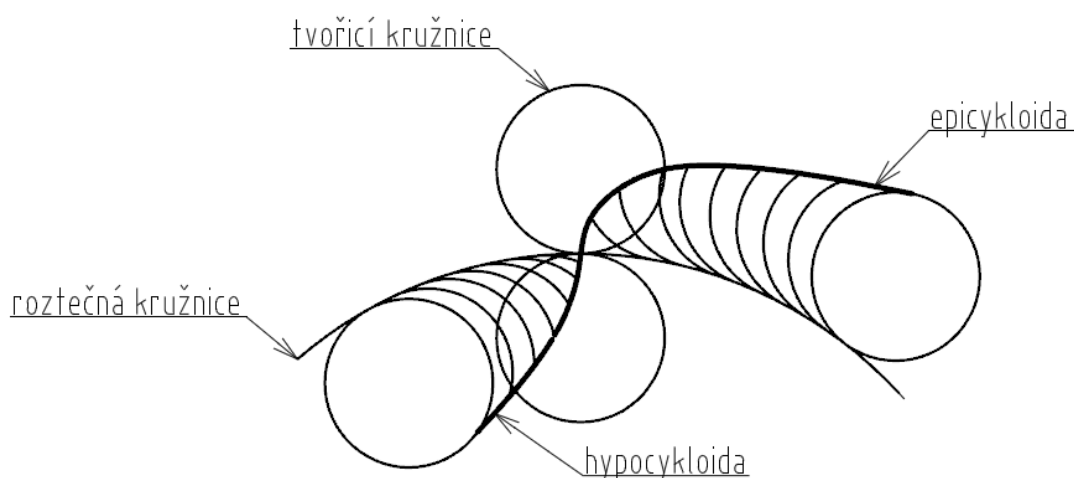
Obr. 1 Mechanismus Antikythera [29].

1 DRUHY OZUBENÍ A SOUKOLÍ

1.1 Geometrie profilu zubu:

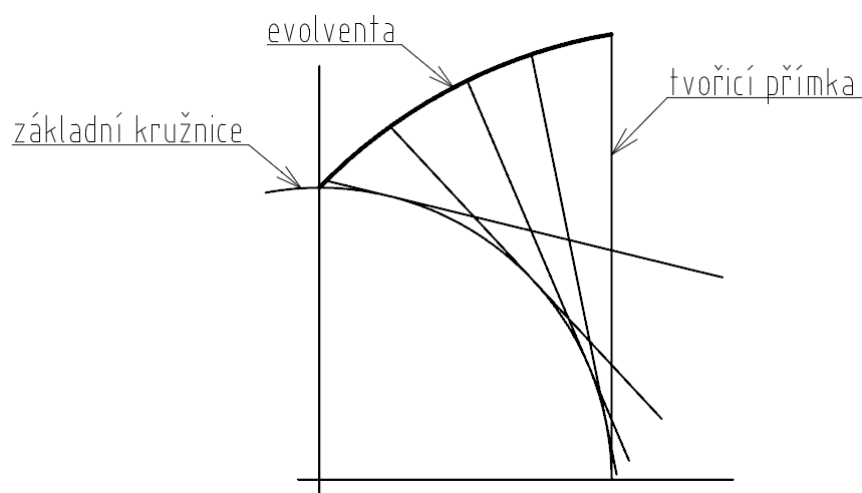
Mezi nejvýznamnější zubové profily v současnosti patří ozubení cykloidní, Wildhaber–Novikovo a nejvíce ve strojírenství rozšířené evolventní. Hlavní nevýhodou cykloidního a Wildhaber–Novikova ozubení v porovnání s evolventním, je nutnost dodržení předepsané osové vzdálenosti ozubených kol a nákladná výroba, způsobená složeným tvarem zubu [8,13].

Cykloidní – tvar zubu je vytvořen odvalováním tvořící kružnice po roztečné kružnici nebo přímce z vnějšku epicykloidou nebo zevnitř hypocykloidou (obr. 2) [8].



Obr. 2 Epicykloida a hypocykloida.

Evolventní – tvar zubu je odvozen od evolventy (obr. 3), která vznikne odvalováním tvořící přímky po základní kružnici [8].

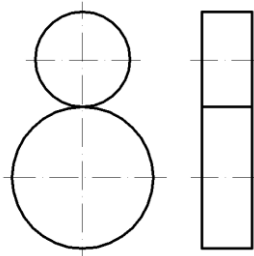


Obr. 3 Evolventa.

Wildhaber–Novikovo (kruhový oblouk) – zuby kol mají konvexní, popř. konkávní boky tvořené kruhovými oblouky [8].

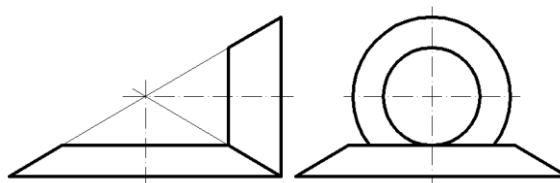
1.2 Rozdělení ozubených kol podle vzájemné polohy os

- s rovnoběžnými osami – čelní soukolí



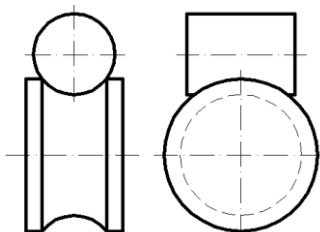
Obr. 4 Čelní soukolí.

- s různoběžnými osami – kuželové soukolí

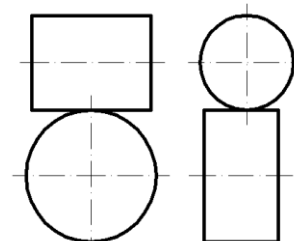


Obr. 5 Kuželové soukolí.

- s mimoběžnými osami – šnekové a šroubové soukolí



Obr. 6 Šnekové soukolí.



Obr. 7 Šroubové soukolí.

1.2.1 Čelní (válnová) soukolí

Čelní ozubená kola jsou nejrozšířenější skupinou ozubených kol. Poloha os většího ozubeného kola a menšího (pastorku) je rovnoběžná (viz. obr. 4). V případě hřebenového ozubení má větší kolo tvar hřebene (ozubené kolo o nekonečně velkém průměru), které ve spojení s ozubeným kolem umožňuje přeměnu otáčivého posuvu na posuvný a opačně. Boky zubů spolu zabírajících kol se po sobě odvalují. Aby nedošlo k podřezání paty zubů, volí se minimální počet zubů $z_{\min} = 14$ a úhel záběru $\alpha = 20^\circ$ [8,23,35].

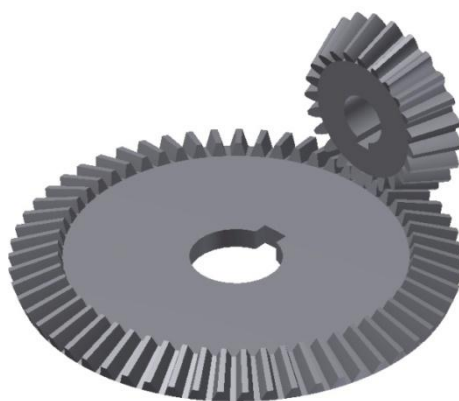
1.2.2 Kuželová soukolí

Kuželová soukolí slouží k přenosu otáčivého pohybu mezi dvěma různoběžnými hřídeli. Tvoří ho dva odvalovací (roztečné) kužele, které se dotýkají v povrchové přímce a mají společný vrchol v průsečíku os obou hřídelů (obr. 5). Úhel, který osy svírají, může být prakticky libovolný. Z hlediska výroby je ale nejpoužívanější úhel

90°. Boky zubů spolu zabírajících kol se po sobě odvalují. V porovnání s čelním soukolím má menší účinnost ($\eta = 96 \%$) a stejně jako u čelního ozubení, aby nedošlo k podřezání paty zubů, volí se minimální počet zubů $z_{\min} = 25$ a úhel záběru $\alpha = 15^\circ$ [8,35].

Kuželová kola zajišťují tichý chod, používají se pro vyšší zatížení a obvodové rychlosti, mají delší životnost. Mezi nevýhody patří náročnost a nákladnost výroby (je nutné použít speciální stroje a nástroje), také je nutné kromě délkových úchylek sledovat i úhlové [8].

Podle tvaru ozubení lze rozdělit kuželová ozubená kola se zuby přímými (obr. 8), šikmými, šípovými, kruhovými (Gleason a Gleason–Zerol), paloidními, eloidními, cyklopaloidními a dalšími.



Obr. 8 Kuželové soukolí s přímými zuby.

1.2.3 Šroubová soukolí

Šroubová soukolí slouží k přenosu otáčivého momentu mezi dvěma mimoběžnými hřídeli (obr. 7). Boky zubů spolu zabírajících kol se po sobě odvalují a současně posouvají (šroubový pohyb). Teoretickým základem šroubových soukolí je hyperboloidní soukolí. Výroba takového soukolí není však doposud prakticky vyřešena a proto slouží jen jako teoretický základ pro šroubová válcová a kuželová soukolí [8,35].

Šroubová válcová soukolí (obr. 9):

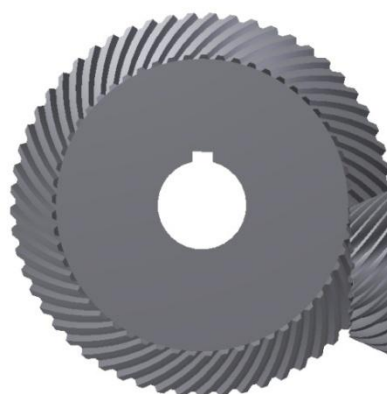
Hyperboloidy jsou nahrazeny válci ve střední části hyperboloidů. Tvoří je dvě čelní kola se šikmými zuby. Od čelních soukolí se liší hlavně podélným skluzem a bodovým záběrem. Proto mohou přenášet jen malé výkony a mají nízkou účinnost [22,35].

Šroubová kuželová soukolí (obr. 10):

Hyperboloidy jsou nahrazeny kužely z okrajových částí hyperboloidů. Jsou tvořeny dvěma kuželovými koly se šikmými nebo zakřivenými zuby, jejichž osy se neprotínají [22,35].



Obr. 9 Šroubové válcové soukolí.



Obr. 10 Šroubové kuželové soukolí.

V porovnání s valivými (čelními, kuželovými) soukolími se šroubová soukolí vyznačují vysokým tlakem mezi zuby a současně velkou skluzovou rychlostí. Proto je nutné volit materiály s požadovanou pevností a dobrými třecími vlastnostmi [8].

Předností těchto soukolí je tichý a klidný chod, ale v důsledku nízké účinnosti (67–74 %) nejsou tolik využívána [35].

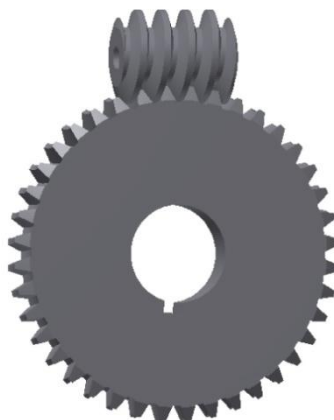
1.2.4 Šneková soukolí

Šneková soukolí (obr. 11) jsou zvláštním případem šroubového válcového soukolí, sloužící k přenosu otáčivého momentu mezi dvěma mimoběžnými hřídeli (obr. 6), jejichž osy jsou nejčastěji kolmé. Jedno z kol je malého průměru a s malým počtem zubů (19). Tyto zuby tvoří celistvé závity, připomínající jednochodý nebo vícechodý šroub, který se nazývá šnek. Spolu zabírající kolo je šnekové kolo [8,35].

Podle tvaru základních těles se šneková soukolí dělí [8]:

- soukolí válcová – šnek i kolo mají tvar válců,
- soukolí smíšené – šnek je válcový a šnekové kolo globoidní,
– šnek je globoidní a šnekové kolo válcové,
- soukolí globoidní – šnek i kolo mají globoidní tvar,
- zvláštní případ – šnek a šnekový hřeben.

Šneková soukolí mohou přenášet velké výkony (běžně 60 kW, lze i 200 kW) a jsou schopna realizovat velmi vysoké převodové poměry (běžně $i = 10$ až 80). Díky svým malým rozměrům mají i nízkou hmotnost a jsou charakteristické klidným a tichým chodem. Nevýhodou je velký skluz v ozubení, způsobený ztrátami třením a z toho vyplývá nižší účinnost, než u čelních kol. Účinnost klesá rostoucím převodem. Výroba šnekových soukolí je v porovnání se soukolími valivými dražší, náročnější a vlivem opotřebení je životnost nižší [8,35].



Obr. 11 Šnekové soukolí.

2 ČELNÍ OZUBENÍ

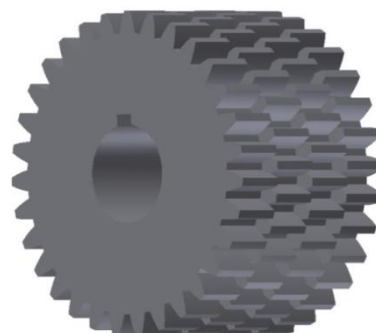
2.1 Rozdělení podle tvaru ozubení

Podle tvaru ozubení lze rozdělit čelní ozubená kola na kola se zuby přímými, šikmými, šípovými a křivkovými.

2.1.1 Čelní ozubená kola s přímými zuby

U čelních kol s přímými zuby (obr. 12) jsou boční křivky rovnoběžné s osou kola. Jde o výrobně nejjednodušší a nejčastěji používaný typ ozubených kol. V ozubení nevzniká axiální síla, ale dochází k rázům, které jsou způsobeny tím, že zub jde do záběru celý a dochází tak k jeho okamžitému zatížení [22,23,35].

Dalším provedením je čelní ozubené kolo se stupňovitými zuby (obr. 13). Jedná se o dvě stejná kola, pootočená vůči sobě o polovinu zubové rozteče. Tím je přenos výkonu rozdělen a v porovnání s ozubením s přímými zuby rázy sice zůstávají, ale jsou menší [22].



Obr. 12 Čelní ozubené kolo s přímými zuby. Obr. 13 Čelní ozubené kolo se stupňovitými zuby.

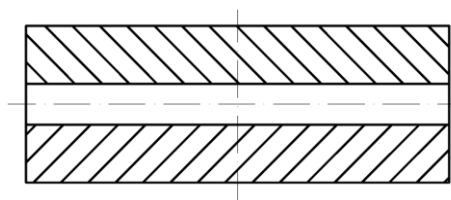
2.1.2 Čelní ozubená kola se šikmými zuby

Čelní ozubená kola se šikmými zuby (obr. 14) se stále více uplatňují místo kol se zuby přímými. Zub kola se dostává do záběru i ze záběru postupně, díky tomu je zub zatěžován pozvolně a chod je tedy tichý a klidný, v porovnání s přímými zuby. V záběru bývá více zubů najednou, na které je rozloženo zatížení, a proto může ozubení přenášet větší výkony. Nevýhodou ozubení je vznik axiální síly vlivem zešikmení, která se snaží kolo odtlačit do strany. Odtlačení lze zabránit pomocí ložisek nebo druhým ozubeným kolem s opačným sklonem zubů [11,22].

Zvláštním případem je čelní ozubení s dvojnásobně šikmými zuby (viz. obr. 15). Toto provedení eliminuje axiální sílu, ale příznivý vliv postupného záběru zůstává. Zápich uprostřed kola je pro zjednodušení výroby ozubení [22].



Obr. 14 Čelní ozubené kolo se šikmými zuby.



Obr. 15 Náhled na ozubení s dvojnásobně šikmými zuby.

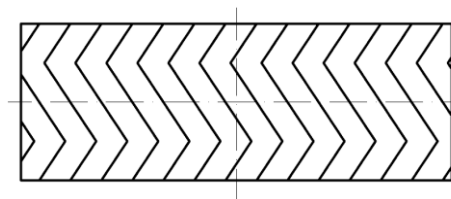
2.1.3 Čelní ozubená kola se šípovými zuby

Zvláštním případem čelního ozubení se šikmými zuby je ozubení šípové (viz. obr. 16), které eliminuje vznik axiální síly. V porovnání s dvojnásobně šikmým ozubením, je vyrobeno bez dělicího zápichu. Vzhledem k náročné výrobě může být kolo složeno ze dvou polovin s opačným sklonem zubů [22,33].

Další variantou na obr. 17 je čelní ozubené kolo s dvojnásobně šípovými zuby, kdy zalomení umožňuje přenášení extrémních výkonů [22].



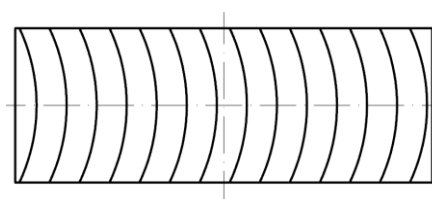
Obr. 16 Čelní ozubené kolo se šípovými zuby.



Obr. 17 Náhled na ozubení s dvojnásobně šípovými zuby.

2.1.4 Čelní ozubená kola s křivkovými zuby (kruhové oblouky)

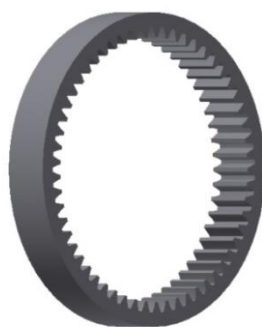
Čelní ozubená kola s křivkovými zuby mají obdobné vlastnosti, jako ozubení se šípovými zuby. Výhodou tohoto provedení je kruhový tvar, který má lepší pevnostní vlastnosti, než zlomené přechody u šípových zubů [22].



Obr. 18 Náhled na ozubení s kruhovými oblouky.

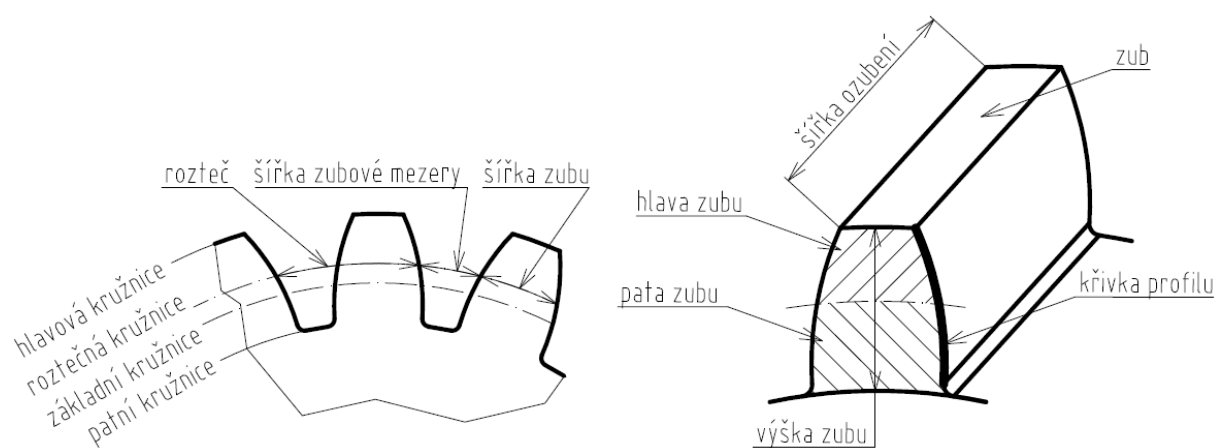
2.1.5 Čelní ozubená kola s vnitřním ozubením

Soukolí s vnitřním ozubením (viz. obr. 19) se skládá z menšího kola (pastorku) s vnějším ozubením a z většího kola s vnitřním ozubením. Na rozdíl od vnějšího ozubení zajišťuje toto provedení stejný směr otáčení obou ozubených kol. Výhodou vnitřního ozubení je malý zastavěný prostor, lepší kluzné vlastnosti, menší opotřebení, hlučnost a kvalitní záběr ozubení, protože pastorek má vždy vypouklé boky zubů a větší kolo má vyduté boky (snížený kontaktní tlak). Nevýhodou je náročnost výroby ozubeného kola s vnitřním ozubením [8,22,33].



Obr. 19 Čelní ozubené kolo s vnitřním ozubením.

2.2 Základní geometrické parametry čelního ozubení



Obr. 20 Základní parametry ozubeného kola.

Modul **m** – udává se v milimetrech a základní hodnoty modulu jsou normalizovány (např. dle ČSN 01 4608).

$$m = \frac{d}{z} = \frac{p}{\pi} \quad (1)$$

Základní kružnice **d_b** a úhel záběru **α** (nejčastěji 20°)

$$d_b = d \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Rozteč **p**

$$p = \frac{\pi \cdot d}{z} = \pi \cdot m \quad (3)$$

Roztečná kružnice **d**

$$d = z \cdot m = \frac{z \cdot p}{\pi} \quad (4)$$

Vzdálenost os **a**

$$a = \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot m \quad (5)$$

Hlavová kružnice **d_a**

$$d_a = d + 2 \cdot h_a \quad (6)$$

Patní kružnice **d_f**

$$d_f = d - 2 \cdot h_f \quad (7)$$

Hlava zubu – výška hlavy zubu **h_a**

$$h_a = 1 \cdot m \quad (8)$$

Pata zubu – výška paty zubu **h_f**

$$h_f = 1,25 \cdot m \quad (9)$$

Výška zubu **h**

$$h = h_a + h_f = 2,25 \cdot m \quad (10)$$

Tloušťka zubu **s** a šířka zubové mezery **e**

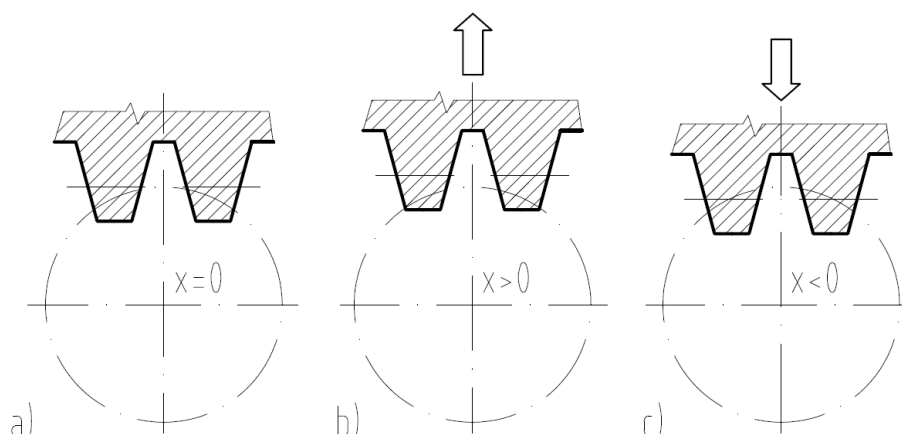
$$s + e = p \quad (11)$$

2.3 Korekce ozubení

Korekce ozubení se používá v případech, kdy potřebujeme dosáhnout přesné osové vzdálenosti, zabránit nepříznivému podřezání pat zubů a tím i snížení pevnosti kol s počtem zubů menším, než je minimální počet zubů z_{\min} , který je u čelních kol 14. Princip korekce spočívá v přibližování nebo oddalování výrobního nástroje od středu kola, tím se mění tvar i vlastnosti evolventního ozubení a vytváří se tak korigované ozubení [16,35].

$$x \cdot m \quad (12)$$

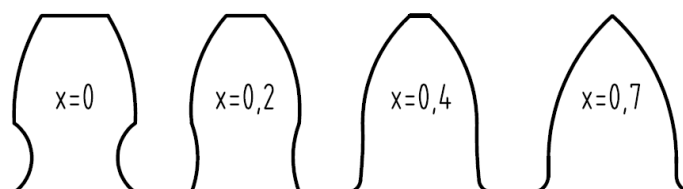
Posunutí vyjadřujeme podle vztahu (12), kdy součinitelé posunutí x_1 a x_2 udávají násobek modulu, o který je nástroj při výrobě vysunutý (kladná hodnoty x) nebo zasunutý (záporná hodnota x) do ozubeného kola. Tak dostaneme kola korigovaná +V, -V a kola nekorigovaná N (obr. 21). Lze vytvořit i kombinaci jednotlivých kol VN [33,35].



Obr. 21 a) nekorigované kolo N, b) kladná korekce +V, c) záporná korekce -V.

Korekcí je možné dosáhnout [16]:

- přesné osové vzdálenosti,
- zabránit podřezání zubů,
- zabránit špičatosti zubů (viz. obr. 22),
- snížit hlučnost a vibrace ozubení,
- zlepšit účinnost a únosnost ozubení.



Obr. 22 Vliv velikosti korekčního součinitele na tvar zubu.

2.4 Materiály ozubených kol

Na výrobu ozubených kol je využívána velká škála konstrukčních materiálů. Materiál se volí především podle následujících hledisek: pevnost, cena materiálu a jeho tepelného zpracování, obrobitelnost, prokalitelnost, stupeň namáhání, rozměru ozubeného kola a podle sériovosti výroby. Zpravidla se dodržuje zásada, že pastorek má mít vyšší tvrdost, než kolo [16].

2.4.1 Litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem [12,23]

- s lupínkovým grafitem (např. ČSN 42 2425), s kuličkovým grafitem (např. ČSN 42 2307),
- pro menší neproměnná namáhání a malé obvodové rychlosti,
- zuby kol mají malou pevnost v ohybu a špatně snášejí rázy,

- dobrá odolnost proti vzniku pittingu (mechanická eroze obrobené plochy, která vzniká při velkých rychlostech a tlacích) a proti zadírání,
- nízká hlučnost,
- kola z litin se často kombinují s ocelovými pastorky.

2.4.2 Oceli [12,23]

- jsou nejčastěji používaným materiálem díky svým vlastnostem (dobrá pevnost, tažnost, tepelná vodivost),
- pro méně namáhaná kola se používají oceli třídy 11, které se párují s pastorky z ocelí třídy 12 a 13,
- pro vyšší krouticí momenty se používají zušlechtěné oceli (12 060, 15 240) a oceli pro povrchové kalení (11 600, 12 050),
- kola namáhaná otěrem se vyrábějí z cementačních ocelí (12 020),
- kola, jejichž zuby nelze brousit, se vyrábějí z nitridační oceli (14 340).

2.4.3 Plastické hmoty [12,23]

- používají se ozubená kola z termoplastu POM (polyformaldehyd), výhodou je oproti ocelovým kolům pětinasobně menší hustota, dobrá obrobitelnost, malé opotřebenění a absorpce vody, nevýhodou je problematické upnutí polotovaru,
- ozubená kola z polyamidů nazývané Nylonu, používané pro malá zatížení a bez potřeby mazání, mají oproti ocelovým kolům několikanásobně menší hustotu, při dobrých pevnostních vlastnostech, dlouhou životnost, ale nevýhodou je absorpce vody,
- plastická kola jsou vhodná spíše pro kinematické převody, mají nízkou únosnost v ohybu i dotyku, špatnou tepelnou vodivost,
- výhodami jsou nízká hmotnost, dobrá odolnost vůči korozi a chemickým vlivům,
- kola z plastů jsou často kombinována s ocelovým nebo litinovým kolem.

2.4.4 Mosazi a bronzы [12,23]

- používají se pro agresivní prostředí, pro zajištění lepších kluzných vlastností,
- vykazují větší deformace zubů a tím i lepší rozložení zatížení,
- častou kombinací je ocelový pastorek s bronzovým kolem,
- využívají se pro ozubená kola kinematických převodů v jemné mechanice.

2.4.5 Slinuté kovy [12]

- použití pro kinematické převody,
- průměr kola je omezen na přibližně 80 mm.

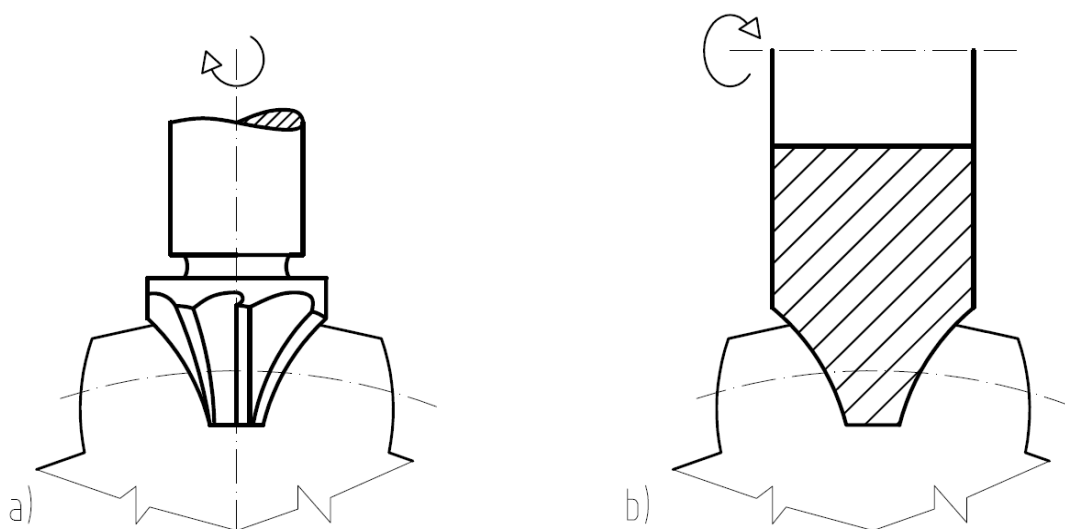
3 TECHNOLOGIE VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ

Výroba takové tvarově složité součásti, jako je ozubené kolo, je technicky i ekonomicky náročná. Postup výroby záleží především na požadovaných vlastnostech ozubeného kola a na zvoleném materiálu. Přesnost ozubení při obrábění ovlivňuje zejména kinematika obráběcího procesu, technologické základny, nástroj, způsob upnutí obrobku a řezné prostředí [10,33].

U ozubených kol minimálně zatížených a nevyžadujících vysokou přesnost, lze použít jednu z méně nákladných metod, než třískové obrábění. Nejběžnějším způsobem je výroba plastových ozubených kol vstřikováním do forem nebo další metodou je stříhání z plechu, s využitím přesného stříhání [33].

3.1 Frézování dělicím způsobem

Frézování dělicím způsobem patří k nejstarším a méně přesným metodám výroby čelních ozubených kol. Jako nástroj se používají čepové (stopkové) modulové frézy (obr. 23a) nebo kotoučové modulové frézy (obr. 23b), které mají tvar zubové mezery. Po vyfrézování jedné zubové mezery se kolo upnuté v dělicím přístroji pootočí o jednu zubovou rozteč a frézuje se další zubová mezera [10,33].



Obr. 23 Frézování dělicím způsobem: a) čepová modulová fréza, b) kotoučová modulová fréza.

Frézování kotoučovou frézou je výkonnější, ale stopkovou frézou lze kromě přímého a šikmého ozubení frézovat i ozubení šípové. Při frézování šikmých zubů kotoučovou modulovou frézou se natočí pracovní stůl frézy s obrobkem vzhledem k ose vřetena o úhel sklonu zubů, v případě použití čepové modulové frézy se pracovní stůl nenatáčí. Řezná rychlost při frézování kotoučovou i čepovou frézou se volí $10\text{--}20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ [9,10,27].

Modulové frézy jsou dodávány v sadách, kdy jeden nástroj s daným modulem se používá pro frézování kol určitého rozsahu zubů, tímto dochází k určité nepřesnosti tvaru boku zubu [24].

Na obr. 24 a 25 jsou příklady nástrojů používaných při frézování dělicím způsobem.



Obr. 24 Čepová modulová fréza [15].

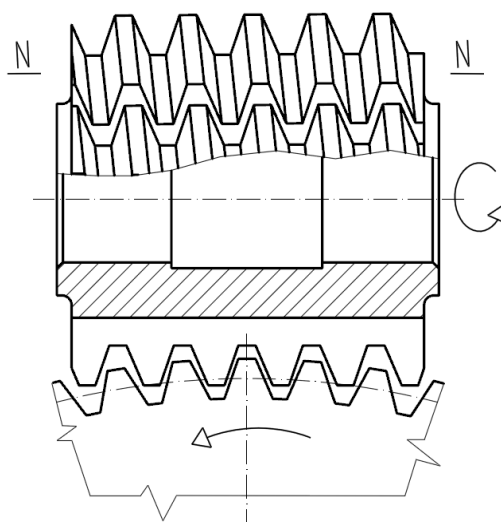


Obr. 25 Kotoučová modulová fréza [3].

Dělicím způsobem lze obrábět čelní ozubená kola velkých modulů ($m = 80 \text{ mm}$) a průměrů (až 12000 mm) na odvalovacích, univerzálních nebo speciálních frézách, především při kusové výrobě [10,27].

3.2 Frézování odvalovacím způsobem

Frézování odvalovacím způsobem (obr. 26) patří k nejproduktivnějším metodám výroby ozubených kol a v současné době postupně nahradilo metodu dělicí, díky větší přesnosti a rychlosti. Je založeno na principu záběru šneku s ozubeným kolem. Nástroj je odvalovací fréza, která má tvar šneku, konající rotační (řezný) a posuvný (záběrný) pohyb přes obrobek, který rotuje [10,23,33].



Obr. 26 Průběh odvalovacího frézování.

Profil zubů odvalovací frézy v normální rovině má lichoběžníkový tvar, podobně jako u ozubeného hřebene. Evolventa boků zubů obráběného kola vznikne odvalem boku zubů frézy. Proto jednou odvalovací frézou můžeme vyfrézovat ozubení všech kol stejného modulu a úhlu záběru, bez ohledu na počet a sklon zubů [10,23,24].

Během odvalování zabírají všechny zuby frézy současně, díky tomu je průběh frézování plynulý (obrobek se za jednu otáčku frézy pootočí o jednu zubovou rozteč), klidný a bez rázů. Jako všechny ostatní metody frézování se vyznačuje přerušovaným řezem během otáčení nástroje a nerovnoměrnou tloušťkou třísky podél záběru. Při první otáčce vyráběného kola se obrobí všechny zubové mezery částečně, při dalších otáčkách se postupně prodlužují až do doby, kdy fréza projede celou šířkou ozubeného kola [9,23,33].

Samotné frézování může probíhat dvěma způsoby, a to sousledně nebo nesousledně. Většina frézek pracuje nesousledným způsobem (nástroj najíždí do záběru shora dolů). Novější frézky pracující sousledným způsobem (zdola nahoru), jsou sice náročnější na konstrukci stroje, ale umožňují vyšší řeznou rychlost o 20–40 % a vyšší posuv až o 80 % [23,33].

Na odvalovací frézce je obrobek upnut na stole, který se otáčí, fréza je upnuta na trnu vřetene frézky a je natočena o úhel stoupání šroubovice. Fréza se vyklání podle pravého nebo levého sklonu zubu. Při frézování kola se šikmými zuby je třeba natočit frézu ještě o úhel stoupání šroubovice zubů kola [24,33].

Určitou nevýhodou odvalovacího frézování je velký výběh nástroje a nemožnost výroby vnitřního ozubení [9].

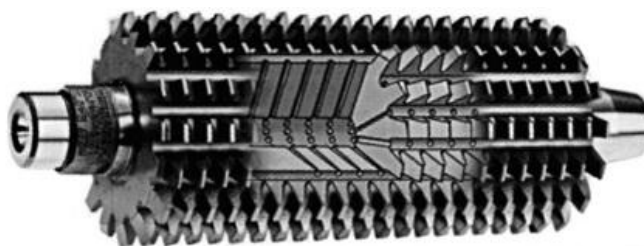
Odvalovací frézy se vyrábějí různých konstrukčních provedení, některá z provedení jsou zobrazeny na obr. 27–29.



Obr. 27 Monolitní (celistvá) odvalovací fréza [15].



Obr. 28 Odvalovací fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami [21].



Obr. 29 Odvalovací fréza s vnitřním přívodem oleje nebo vzduchu [18].

Kinematika řezného pohybu vychází z podmínky:

$$\frac{n_k}{n_f} = \frac{z_f}{z_k} \quad (13)$$

kde: n_k [min^{-1}] - otáčky obráběného kola,
 n_f [min^{-1}] - otáčky odvalovací frézy,
 z_k [-] - počet zubů obráběného kola,
 z_f [-] - počet chodů odvalovací frézy.

Frézování odvalovacím způsobem se provádí na odvalovacích frézkách, které jsou zpravidla vybaveny zařízením pro práci v automatickém cyklu a některé jsou vybaveny různými typy CNC řídicích systémů [9].

Na odvalovacích frézkách je možné obrábět čelní, řetězová a šneková kola, lze také frézovat drážkové hřídele. Vyráběná kola modulů do 40 mm a průměrů do 2 m (výjimečně moduly až 75 mm a průměry do 10 m). Řezná rychlost se při použití odvalovacích fréz z RO volí $15\text{--}30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, u SK se volí až $120 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ [26,27].

Svislá odvalovací frézka na ozubení OFA 32 CNC 6 (obr. 30) firmy TOS, vhodná jak pro sériovou, tak kusovou výrobu, umožňuje rychlou a snadnou obsluhu, seřízení i údržbu. Je vybavena řídicím systémem Sinumerik a má 6 řízených os [32].



Obr. 30 Odvalovací fréza OFA 32 CNC 6 [32].

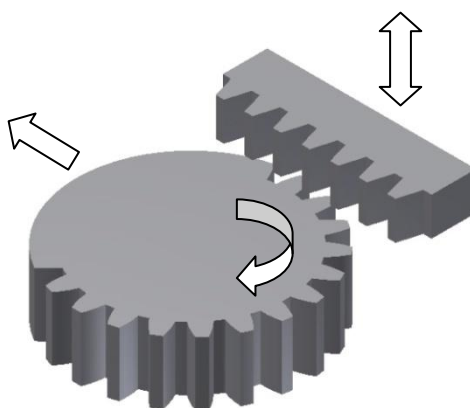
3.3 Odvalovací obrázení čelních ozubených kol

Odvalovací způsoby obrázení ozubených kol jsou přesnější a rychlejší, než odvalovací frézování.

Při výrobě čelního ozubení obrázením používáme odvalovací způsob obrábění, a to ozubeným hřebenem nebo kotoučovým nožem.

3.3.1 Odvalovací obrázení hřebenovým obrážecím nožem (MAAG)

Obrázení ozubení čelních ozubených kol hřebenovým nožem je založeno na záběru ozubeného hřebene (nástroj) s ozubeným kolem (obrobek). Nástroj nastavený na hloubku zubu koná řezný pohyb přímočarý vratný a postupně se vřezává do obrobku, který se otáčí a posouvá (viz. obr. 31). Z toho vyplývá, že při práci obrábí několik zubů hřebene současně. K záběru nástroje s obrobkem dochází při pohybu dolů, proto je vhodné nástroj při zpětném pohybu nepatrně oddálit z řezu, aby nedošlo ke kontaktu hřbetu nástroje s obrobkem. Jakmile vyjde poslední zub hřebene ze záběru a obráběné kolo se odvalí na jeho konec, posuv i otáčení obrobku se zastaví a přesune se zpět do výchozí polohy. Celý postup se opakuje tak dlouho, než jsou vytvořeny zuby po celém obvodu kola [10,24].



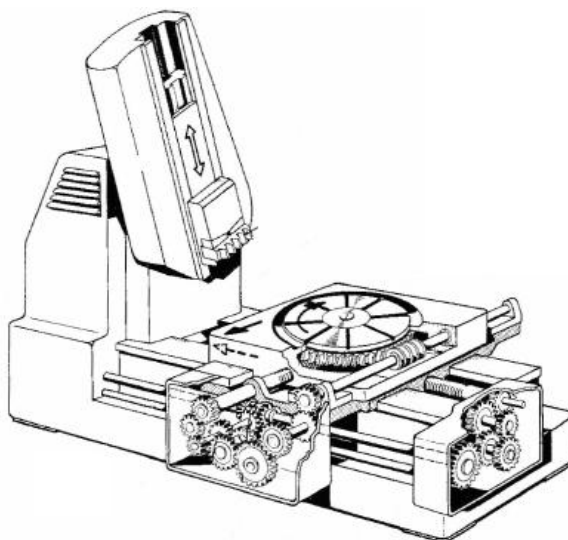
Obr. 31 Princip odvalovacího obrázení hřebenovým obrážecím nožem.

Ve strojařském světě je tato metoda výroby známá jako metoda **MAAG** a v současné době nachází uplatnění především v kusové výrobě ozubených kol velkých modulů (do 20 mm) a průměrů (do 5000 mm). Z toho vyplývá, že dosahovaná řezná rychlost bude menší, než u metody Fellows a pohybuje se mezi 3–20 m·min⁻¹. Výhodou je vysoká přesnost díky jednoduchému a přesnému nástroji a přesnému a dostatečně tuhému vedení smykadla. Hřebenový obrážecí nůž (obr. 32) je tedy díky své jednoduchosti levný, ale naopak obrážecí stroj kvůli požadovaným vlastnostem je finančně náročnější [18,23].



Obr. 32 Hřebenový obrážecí nůž [2,7].

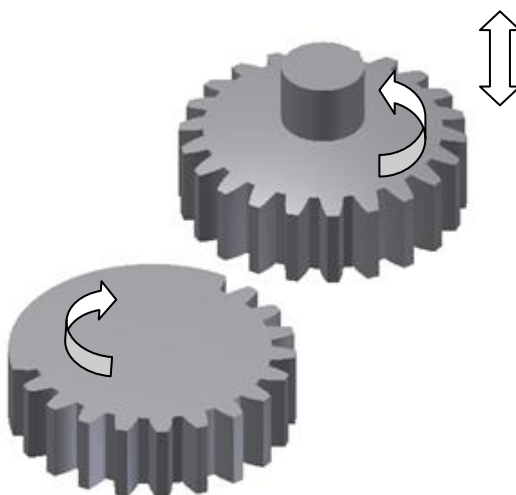
Na obráběcích strojích (obr. 33) lze jedním nástrojem daného modulu vyrábět ozubená kola s libovolným počtem zubů a to s přímými nebo šikmými zuby. Šikmé ozubení je obráženo hřebenem se šikmými zuby, nebo hřebenem se zuby přímými, kdy se smykadlo vykloní o úhel sklonu zubů obrobku. Šípové ozubení lze obrážet na strojích, které jsou vybaveny dvěma protiběžnými smykadly [10,26].



Obr. 33 Obrážečka MAAG pro obrábění šikmého ozubení [26].

3.3.2 Odvalovací obrázení kotoučovým obrážecím nožem (FELLOWS)

Obrázení kotoučovým nožem na obr. 34, v provozních podmínkách taky známé jako metoda **FELLOWS**, je založeno na záběru dvou ozubených kol (nástroj a obrobek), které se po sobě odvalují. Kotoučový nůž (nástroj) koná přímočarý vratný pohyb ve směru osy a současně se pomalu otáčí, ozubené kolo (obrobek) se také otáčí. Při pohybu dolů zabírá nůž s obrobkem a koná tak hlavní řezný pohyb, při pohybu nahoru se nástroj mírně oddálí, aby bříty netřely o obrobenou plochu [10,24].



Obr. 34 Princip odvalovacího obrázení kotoučovým obrážecím nožem.

Při odvalování musí být splněna podmínka:

$$z_o \cdot \omega_o = z_n \cdot \omega_n \quad (14)$$

kde: z_o [-] - počet zubů vyráběného kola,
 z_n [-] - počet zubů nástroje,
 ω_o [rad·s⁻¹] - úhlová rychlost vyráběného ozubení,
 ω_n [rad·s⁻¹] - úhlová rychlost nástroje.

Nástroj (obr. 35) má tvar ozubeného kola stejného modulu, jako obráběné kolo. Vyrábějí se stopkové nebo nástrčné. Přesnost v porovnání s metodou MAAG je nižší, protože nástroj nemá jednoduchý tvar, jako obrážecí hřeben, ale je vyráběn tvarovým nástrojem [23].



Obr. 35 Obrážecí kotoučové nože [7].

Tato metoda se vyznačuje vysokou produktivitou, oproti MAAG jsou vyráběna kola menších modulů (0,4–14 mm) a průměrů (do 3000 mm) a dosahuje se řezné rychlosti až 415 m·min⁻¹. Lze vyrábět vnitřní nebo vnější ozubení s přímými nebo šikmými zuby, kdy výroba šikmého ozubení probíhá nástrojem s přímými nebo šikmými zuby, který koná pomocí šroubovitých vodítek šroubový pohyb, natočený pod úhlem stoupání. S využitím speciálních nástrojů je možné vyrábět i neevolventní profily, vačky nebo drážkové hřídele [9,23].

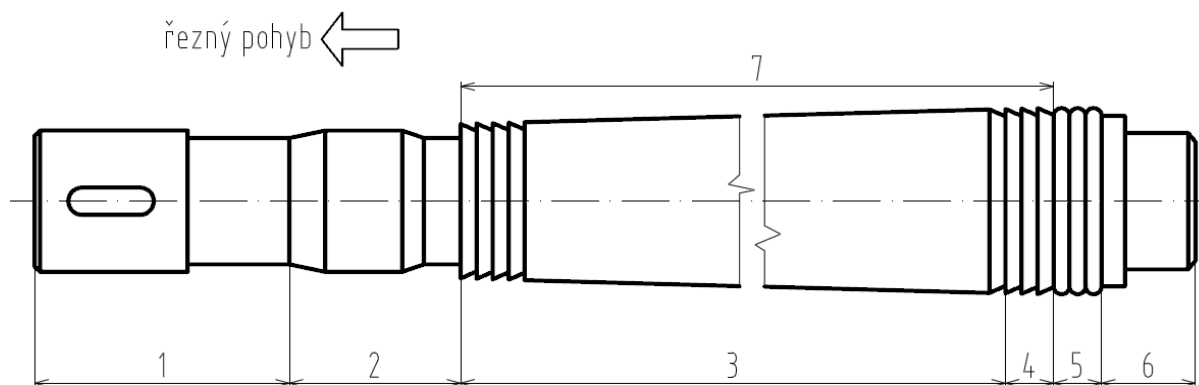
Na obr. 36 je odvalovací obrážečka OHA 50 CNC 5 firmy TOS s řídicím systémem Sinumerik, který zajišťuje řízení pěti os, určená pro obrážení vnitřního i vnějšího ozubení čelních ozubených kol s přímými a šikmými zuby [32].



Obr. 36 Odvalovací obrážečka OHA 50 CNC 5 [32].

3.4 Protahování

Jedná se o vysoce produktivní metodu výroby čelních ozubených kol. Nástrojem je protahovací trn (obr. 37), pro výrobu ozubení úzkých ozubených kol může být použit i kotoučový protahovák. Protahovací trn má profil jedné nebo více zubových mezer a jejich velikost postupně roste, aby byl zajištěn plynulý úběr třísky. Po protažení se kolo pootočí dělicím přístrojem o příslušný počet roztečí a cyklus se opakuje [10,23].

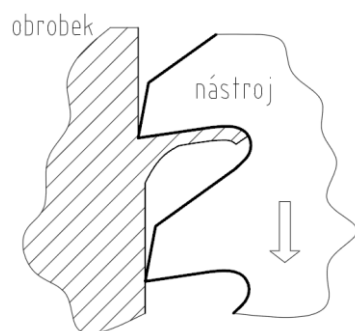


Obr. 37 Schéma protahovacího trnu.

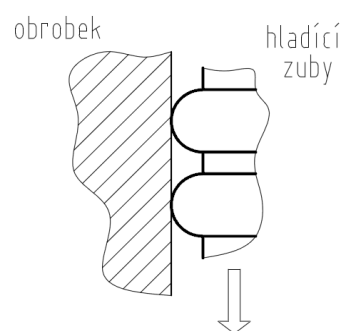
Vysvětlivky k obr. 37:

(1) upínací část, (2) naváděcí část, (3) hrubovací zuby, (4) kalibrovací zuby, (5) hladící zuby, (6) vodící část, (7) řezná část.

Na schematickém zobrazení protahovacího trnu z obr. 37, jsou zuby rozděleny na řeznou část odebírající materiál, která obsahuje i několik kalibrovacích zubů odpovídajících zubovým mezerám kola a hladící zuby, které neodebírají třísku, ale využívají plastické deformace povrchu. Tento princip úběru materiálu je zobrazen na obr. 38 a 39 [23,24].



Obr. 38 Úběr materiálu hrubovacími zuby.



Obr. 39 Zpevňování povrchové vrstvy hladícími zuby.

Tato metoda nám umožňuje obrábění ozubených kol vnějších i vnitřních průměrů s přímými nebo šikmými zuby. Používá se pro vnitřní ozubení s průměrem do 100 mm a modulem do 3 mm. Řezná rychlost se pohybuje v rozmezí $5\text{--}20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, dle použitého materiálu obrobku a nástroje [10,23].

Nástroj (obr. 40) je cenově velmi nákladný, protože pro každý průměr, modul nebo tvar zubu je potřeba jiný nástroj. Proto se protahování využívá hlavně ve velkosériové a hromadné výrobě [10].



Obr. 40 Protahovací trn [25].

Na obr. 41 je horizontální protahovací stroj model H25-75 firmy American Broach & Machine Company.



Obr. 41 Horizontální protahovací stroj H25-75 [1].

4 TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ ČELNÍHO OZUBENÍ

Na ozubení jsou mnohokrát kladeny vysoké nároky na přesnost a drsnost povrchu, proto je nutné použít některou z dokončovacích technologií ozubení.

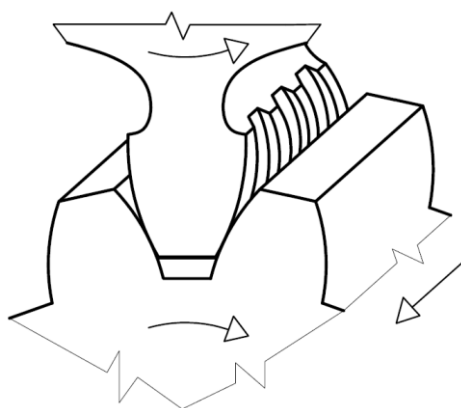
Dokončování ozubení je možné provádět více způsoby:

- ševingování
- honování
- broušení
- lapování

4.1 Ševingování

Ševingování se používá jako dokončovací metoda výroby ozubení vnějších nebo vnitřních čelních ozubených kol s přímými nebo šikmými zuby. Využívá se především u nekalených kol vyrobených odvalovacím frézováním nebo obrážením, případné kalení se zařazuje až po ševingování [19,23].

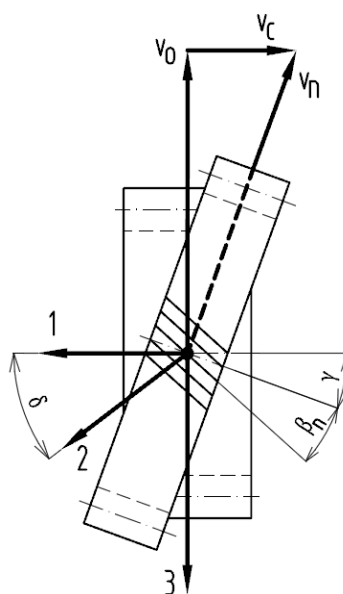
Princip spočívá v záběru nástroje (ševingovacího kola) s obráběným kolem bez vůle, jejichž osy jsou mimoběžné. Při záběru dochází k odebrání velmi malých třísek smykem z povrchu obrobku pomocí břitů ševingovacího kola, které jsou vytvořeny drážkami na bocích zubů. Ševingovací i obráběné kolo se otáčejí a obvykle menší kolo z této dvojice vykonává ještě vratný posuvový pohyb. Na obr. 42 je zobrazen záběr těchto dvou kol [10,19,23].



Obr. 42 Záběr ševingovacího kola (nástroj) a obráběného kola (obrobek).

Metody ševingování podle směru posuvu (obr. 43) [9]:

- 1 – směr posuvu při podélném ševingování,
- 2 – směr posuvu při diagonálním ševingování,
- 3 – směr posuvu při příčném ševingování.



Obr. 43 Metody ševingování

Nástroj může mít v některých případech kromě nejrozšířenějšího tvaru ozubeného kola (obr. 44) i tvar ozubeného hřebene nebo šneku [9].



Obr. 44 Ševingovací kola [5].

Ševingováním se dosahuje zlepšení jakosti povrchu, zlepšení úchylek zubových roztečí a zlepšení profilu zubu. Používané obvodové rychlosti nástroje i obrobku se pohybují mezi $80\text{--}120\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a řezná rychlost dosahuje až $30\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Přídavek na ševingování se volí $0,04\text{--}0,1\text{ mm}$ [23,24].

Na obr. 45 je univerzální švingovací stroj ZS 300 firmy Gleason.



Obr. 45 Univerzální švingovací stroj ZS 300 [6].

Na stejném principu jako švingování je založena i další metoda dokončování ozubení a to **honování**. Honování bývá někdy také označováno jako „brousicí švingování“, při kterém je švingovací kolo nahrazeno kolem ze směsi plastu a brusiva nebo ocelového ozubeného kola, jehož zuby jsou pokryty tenkou vrstvou diamantového brusiva, vázaného pryskyřičným nebo kovovým pojivem. Používá se ke zlepšení geometrického tvaru a drsnosti povrchu kalených ozubených kol [9,10].

4.2 Broušení

Broušení se používá především pro kalená ozubená kola ke zvýšení přesnosti, jakosti povrchu, odstranění deformace po tepelném zpracování a nepřesnosti po předchozím obrábění. V poslední době nahrazuje stále více švingování ozubených kol [10,24].

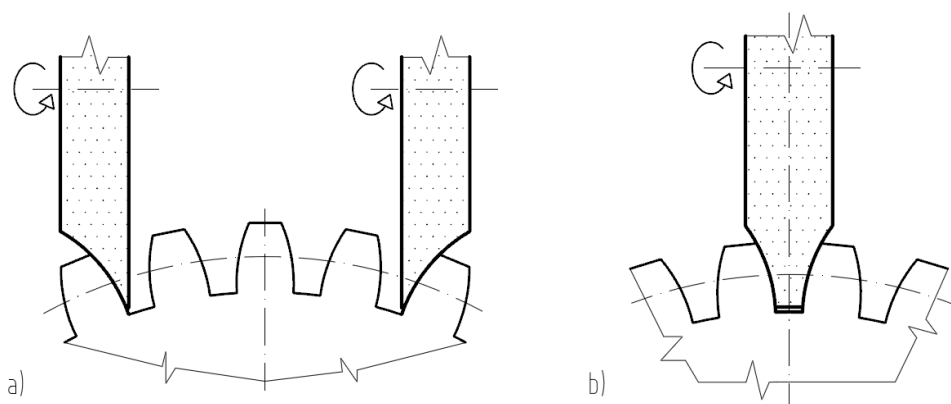
Ozubená kola se brousí:

- dělicím způsobem tvarovými kotouči,
- dělicím způsobem s odvalem boku zubu,
- odvalovacím způsobem,
- do plna.

4.2.1 Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

Broušení se provádí brousicími kotouči s tvarem jednoho boku zubu, kterými se brousí odpovídající boky zubů, nebo kotoučem s tvarem zubní mezery, který brousí oba boky současně. Tyto dvě metody broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči jsou zobrazeny na obr. 46. Obrobek je upnutý v dělicím zařízení, kterým se

po vybroušení boku zubu nebo zubové mezery a následném vyjetí nástroje ze záběru pootočí o jednu zubovou mezeru a proces se opakuje [10,23].



Obr. 46 Broušení ozubení dělicím způsobem: a) dva kotouče s profilem ve tvaru boku zubu, b) jeden kotouč s profilem ve tvaru zubové mezery.

Tato metoda je vhodná pro broušení vnějších i vnitřních čelních ozubených kol. Mezi její výhody patří vysoká produktivita. Tuto technologii lze použít na libovolný profil. Naopak k nevýhodám patří nižší přesnost (závisající na přesnosti dělicího zařízení a profilu brousícího kotouče), vyšší provozní náklady (je nutné použití jiného vybavení pro rozdílný úhel záběru, modul nebo počet zubů) [9,23].

Na obr. 47 jsou uvedeny příklady tvarových brousících kotoučů firmy Krebs-Riedel.



Obr. 47 Tvarové brousící kotouče [4].

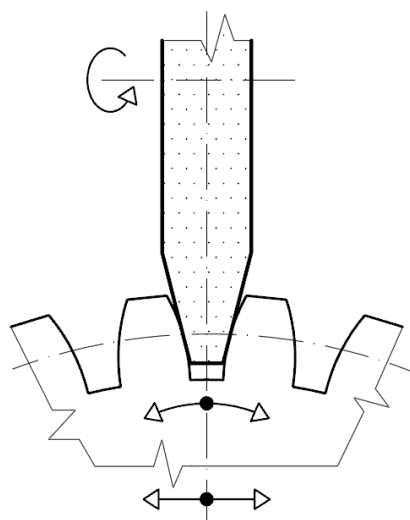
4.2.2 Broušení dělicím způsobem s odvalem boku zubu

Při broušení dělicím způsobem s odvalem boku zubu brousíme čelní ozubené kolo po jedné zubové mezeře jedním (systém Niles), nebo dvěma (systém Maag) brousícími kotouči.

Systém Niles

Využívá jednoho brousícího kotouče, jehož profil je shodný s profilem zubu ozubeného hřebenu, zobrazena na obr. 48. Brousící kotouč se otáčí a vykonává přímočarý vratný pohyb ve směru osy broušeného kola. K zajištění odvalovacího pohybu se broušené kolo otáčí kolem své osy a vykonává podélný pohyb ve směru

osy broušicího kotouče. Po obroušení celé šířky ozubení posune dělicí mechanismus obrobek o jednu rozteč a proces se opakuje [10,23].

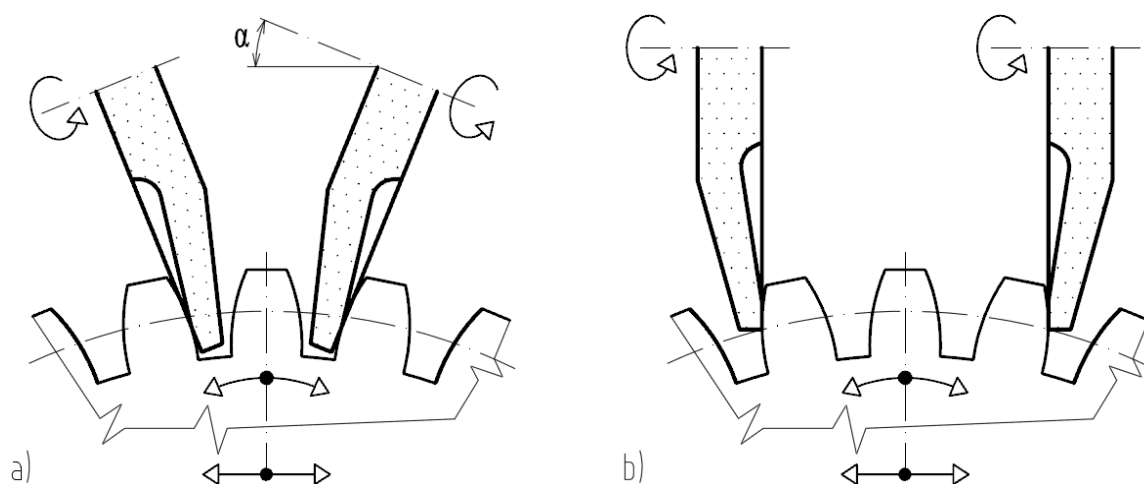


Obr. 48 Broušení s odvalem boku zubu metodou Niles.

Při broušení ozubených kol se šikmými zuby se vykloní smykadlo s broušicím kotoučem o úhel sklonu zubů [9].

Systém Maag

Systém Maag je nejznámějším představitelem tohoto typu broušení a funguje na podobném principu jako systém Niles, ale dosahuje vyšších přesností. U této metody se ozubené kolo brousí dvěma tenkostěnnými talířovými brusnými kotouči, které jsou buď skloněné pod úhlem záběru α (obr. 49a) nebo jsou rovnoběžné (obr. 49b). Brusné kotouče se otáčejí a vykonávají přímočarý vratný pohyb ve směru osy broušeného kola. Odvalovací pohyb vzniká otáčením broušeného kola kolem své osy a jeho příčným pohybem. Po dokončení jedné zubové mezery pootočí dělicí mechanismus kolem o jednu rozteč a proces se opakuje [9,10,26].



Obr. 49 Broušení s odvalem boku zubu metodou Maag.

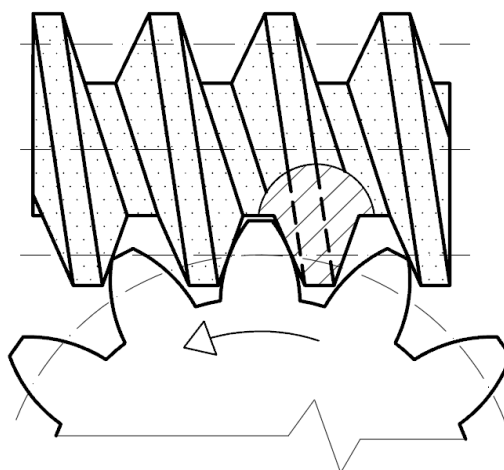
Skloněné broušící kotouče pod úhlem záběru α (15° nebo 20°) umožňují použití dvou pracovních postupů, a to broušení hranou nebo plochou kotouče. Broušení plochou kotouče je produktivnější, dosahuje se vyšší jakosti povrchu boků zubů a je potřeba menší dráha pro obroušení plochy zubu [9].

Při broušení kol s modulem $m > 9$ mm se brousí dvěma kotouči v jedné zubové mezeře, u menších modulů jsou vzdáleny o rozteč. U nejčastěji používané metody broušení dvěma kolmo postavenými kotouči jsou broušící kotouče umístěny přes tři zuby ve vzdálenosti odpovídající poloze roztečné kružnice [10,23].

V případě broušení šikmého ozubení je potřeba nástroj vyklonit o úhel sklonu zubů [23].

4.2.3 Broušení odvalovacím způsobem

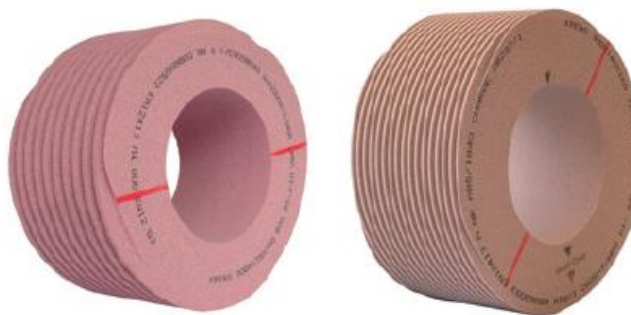
Tato metoda bývá označována jako systém **Reishauer**. Tento způsob je podobný odvalovacímu frézování. Probíhá plynule bez dělení, kde odvalovací fréza je nahrazena broušícím kotoučem, který má tvar šneku (jednochodý nebo dvouchodý průměru 350–400 mm) s profilem ozubeného hřebene. Nástroj vykonává hlavní řezný pohyb, který je rotační. Obrobek se během jedné otáčky nástroje pootočí o jednu zubovou rozteč, tímto se plynule brousí všechny zuby obrobku. Aby bylo obroušeno ozubení v celé délce, musí se broušící kotouč současně pohybovat ve směru broušených zubů. Podmínkou je synchronní běh nástroje a obrobku. Schéma principu této metody je na obr. 50 [23,26,27].



Obr. 50 Broušení ozubení broušícím kotoučem ve tvaru šneku.

Výrobní časy jsou mnohokrát kratší, než u doposud popsaných metod, proto je tato metoda vhodná zejména pro sériovou výrobu ozubených kol s menšími moduly [10,27].

Na obr. 51 jsou uvedeny příklady odvalovacích broušících kotoučů firmy Krebs-Riedel.



Obr. 51 Odvalovací brousicí kotouče [4].

4.2.4 Broušení do plna

Broušení do plna je speciální metodou broušení, kdy brousíme do plného materiálu tvarovým brousicím kotoučem, který má tvar zubové mezery. Obrobek se otáčí kolem své osy a brousicí kotouč postupně odebírá materiál. Po dokončení zubové mezery se obráběné kolo pootočí a proces se opakuje. Používá se u kol s modulem $m < 3 \text{ mm}$ [27].

4.2.5 Stroje pro broušení

Bruska LIEBHERR LCS 300 na obr. 52 je určena pro odvalovací nebo profilové broušení.



Obr. 52 Bruska Liebherr LCS 300 [34].

4.3 Lapování

Lapováním se dosahuje jen zlepšení drsnosti povrchu boků zubů, tvar evolventy se téměř nemění. Využívá se především u tepelně zpracovaných kol. Lapování se provádí litinovým ozubeným kolem (nástroj), které zabírá s lapovaným kolem (obrobek). Lapovací kolo je hnané, má stejný modul jako lapované kolo, které je brzděno a vykonává kmitavý pohyb ve směru osy. Do záběru kol je přiváděna pasta nebo směs oleje s brusivem, která zajišťuje potřebný úběr materiálu [10,28].

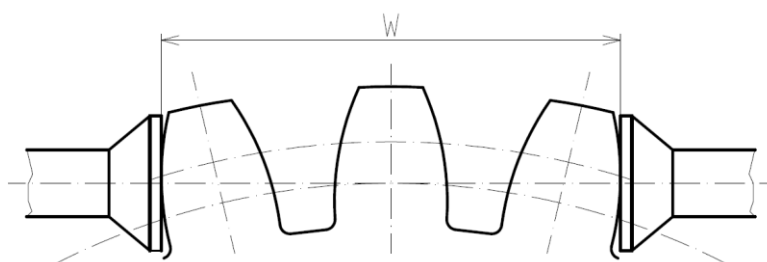
Přídavky na lapování jsou 0,02–0,05 mm a obvodová rychlost je do $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [10].

4.4 Kontrola rozměrů ozubených kol

V následujících třech podkapitolách jsou uvedeny tři základní kontrolní rozměry ozubení. Jedná se o rozměr přes zuby, rozměr zubů v konstantní tloušťce a výšce a rozměr zubů přes válečky.

4.4.1 Kontrolní rozměr přes zuby kola

Kontrola rozměru přes zuby znázorněna na obr. 53 je nejčastější metodou měření. Výhodou této metody je jednoduché měřidlo (talířkový mikrometr, passametr nebo mikropassametr), lze měřit přímo na stroji ve výrobě a měření vychází od obrobených boků zubů, proto není závislé na přesnosti hlavové kružnice [13,30].



Obr. 53 Kontrola rozměru přes zuby.

Počet zubů, přes které se měří (zaokrouhleno na celé číslo) [8]:
pro přímé zuby

$$z' = \frac{z \cdot \alpha}{180} + 0,5 \quad (15)$$

pro šikmé zuby

$$z' = \frac{z \cdot \alpha}{180 \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \beta_b} \quad (16)$$

- kde:
- | | | | |
|-----------|-----|---|---|
| z | [-] | - | počet zubů měřeného kola, |
| z' | [-] | - | počet zubů, přes které se měří, |
| α | [°] | - | úhel záběru profilu, |
| β | [°] | - | úhel sklonu boční křivky zubu, |
| β_b | [°] | - | úhel sklonu boční křivky zubu na zákl. válci. |

Jmenovitý rozměr přes zuby [30]:

$$W = m \cdot \cos \alpha \cdot [\pi \cdot (z' - 0,5) + z \cdot (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{arctg} \alpha)] \quad (17)$$

- kde:
- | | | | |
|-----|------|---|-------------------|
| W | [mm] | - | rozměr přes zuby, |
| m | [-] | - | modul, |

- α [°] - úhel záběru profilu,
 z [-] - počet zubů měřeného kola,
 z' [-] - počet zubů, přes které se měří.

4.4.2 Kontrolní rozměr zubů v konstantní tloušťce a výšce

Tato metoda (obr. 54) se nejčastěji používá při měření kuželových a šnekových kol s přímými evolventními zuby. U čelních kol s přímými, šikmými nebo šípovými zuby se používá tehdy, pokud nelze měřit přes zuby (např. u kol se šikmými zuby a velkým stoupáním). Výhodou této metody je jednoduché měřidlo (posuvné měřítko na tloušťku zubů sdružené s hloubkoměrem na obr. 55, možnost měřit na stroji přímo ve výrobě a nezáleží na počtu zubů. Nevýhodou v porovnání s měřením přes zuby je závislost na přesnosti průměru hlavové kružnice [13,30,36].

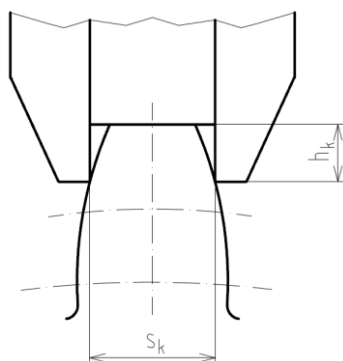
Jmenovitá konstantní tloušťka zubu (tětiva) [30]:

$$s_k = \frac{\pi \cdot m \cdot \cos^2 \alpha}{2} \quad (18)$$

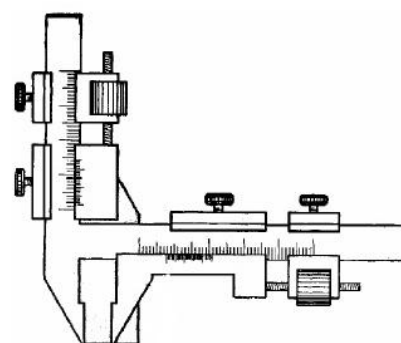
Jmenovitá konstantní hloubka zubu [30]:

$$h_k = m \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}{4} \right) \quad (19)$$

- kde: s_k [mm] - konstantní tloušťka zubu,
 h_k [mm] - konstantní hloubka zubu,
 α [°] - úhel záběru profilu,
 m [-] - modul.



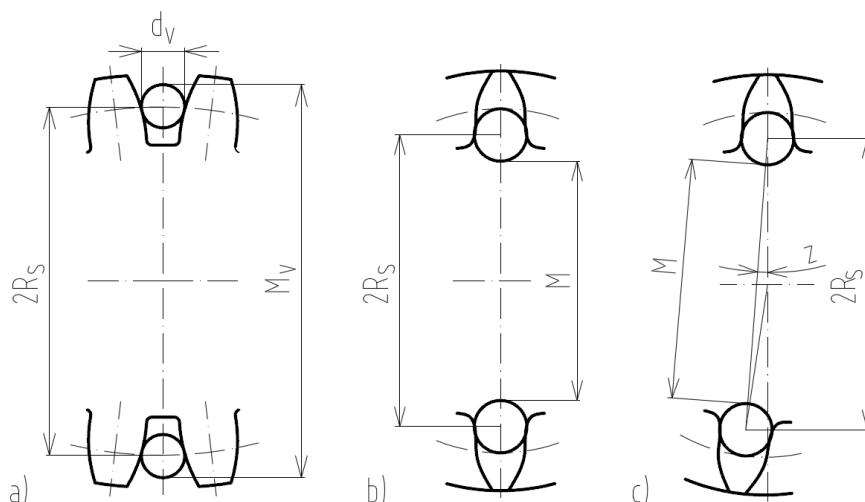
Obr. 54 Kontrola tloušťky zubu v konstantní výšce.



Obr. 55 Posuvné měřítko na tloušťku zubů [36].

4.4.3 Kontrolní rozměr zubů přes válečky

Měření zubů přes válečky nebo kuličky se používá pro měření vnitřního ozubení, lze jej ale použít i pro měření ozubení vnějšího. Na obr. 56 jsou zobrazeny potřebné parametry při kontrole vnitřního a vnějšího ozubení. Tato metoda se používá pro kontrolu ozubených kol s větším počtem zubů jak 20 [13].



Obr. 56 Kontrola: a) vnějšího ozubení, b) vnitřního ozubení se sudým počtem zubů, c) vnitřní ozubení s lichým počtem zubů.

ozubení vnější se sudým počtem zubů [31]:

$$M_v = 2R_s + d_v \quad (20)$$

ozubení vnější s lichým počtem zubů [31]:

$$M_v = 2R_s \cdot \cos\left(\frac{90}{z}\right) + d_v \quad (21)$$

ozubení vnitřní se sudým počtem zubů [31]:

$$M = 2R_s - d_v \quad (22)$$

ozubení vnitřní s lichým počtem zubů [31]:

$$M = 2R_s \cdot \cos\left(\frac{90}{z}\right) - d_v \quad (23)$$

kde: M_v [mm] - rozměr přes válečky vnějšího ozubení,
 M [mm] - rozměr přes válečky vnitřního ozubení,
 d_v [mm] - průměr válečku nebo kuličky,
 R_s [mm] - poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku,
 z [-] - počet zubů.

4.5 Univerzální stroje na kontrolu ozubení

Příkladem univerzálního měřicího stroje může být měřící centrum WGT 600 (obr. 57) společnosti WENZEL group. Na stroji lze měřit všechny typy čelních ozubených kol, s přídavným softwarem kola kuželová, šneková i řezné nástroje (např. odvalovací frézy apod.). Kontrolovaná kola mohou být průměru 5–600 mm s moduly 0,5–20 mm [37].



Obr. 57 Měřící centrum WGT600 a příklady kontroly[37].

4.6 Dosahované výsledky

ISO třídí ozubená kola do 12 stupňů přesnosti (viz tab. 1). Ve vedlejší tabulce (tab. 2) jsou příklady použití ozubených kol podle jejich stupně přesnosti.

Tab. 1 Stupně přesnosti dle ISO [12].

nejvyšší dosažitelná přesnost	2–3
vysoká přesnost	4–5
střední vyšší přesnost	6–7
střední přesnost	8–9
nízká přesnost	10–11
velmi nízká přesnost	12

Tab. 2 Příklady použití [12].

letecké převody	4–5
průmyslové převody	6–7
automobilové převodovky	4–9
převody elektrických motorů	8–9
pomaluběžné převody	10–11

Přesnost a kvalita povrchu vyrobeného ozubeného kola závisí na zvoleném způsobu výroby a dokončení ozubení (tab. 3).

Tab. 3 Dosahované přesnosti [10,27].

Způsob výroby	Stupeň přesnosti ISO	Jakost obrobené plochy Ra [μm]
Frézování dělicím způsobem	9–10	1,6–3,2
Frézování odvalovacím způsobem	5–7	0,8–1,6
Odvalovací obrázení hřebenovým nožem	4–5	0,8–1,6
Odvalovací obrázení kotoučovým nožem	5–6	0,8–1,6
Protahování	4–5	0,4–0,8
Švingování	5–6	0,4–0,8
Honování	5–6	0,2
Broušení odvalovací	2–4	0,2–0,8
Broušení tvarovými kotouči	4–6	0,2–0,8
Lapování	2–4	0,1–0,2

ZÁVĚR

Tato práce s názvem Technologie výroby čelního ozubení v úvodní kapitole popisuje způsoby vzniku profilu zubu a základní rozdělení ozubených kol. Následující druhá kapitola je zaměřena na čelní ozubená kola, na jejich rozdělení podle tvaru ozubení, základní geometrické parametry, korekci ozubení a materiály využívané pro jejich výrobu. Třetí a čtvrtá kapitola popisuje technologie výroby a dokončování čelního ozubení, nástroje, stroje a řezné podmínky používané u jednotlivých metod a následné porovnání dosahovaných přesností a kvality povrchu.

Frézování dělicím způsobem patří k nejstarší a nejméně používané metodě, kvůli dosahování malé přesnosti. Používá se v kusové dílenské výrobě. Lze frézovat přímé, šikmé i šípové ozubení a kola velkých modulů a průměrů.

Frézování odvalovacím způsobem nahradilo v současné době dělicí frézování, díky větší přesnosti a rychlosti. Je vhodné pro kusovou i sériovou výrobu čelních ozubených kol s přímými nebo šikmými. Lze frézovat i kola menších modulů a průměrů.

Odvalovací obrážení hřebenovým nožem (MAAG) je díky jednoduchému a přesnému nástroji nejpřesnější metodou výroby čelních ozubených kol. Uplatnění nachází především v kusové výrobě ozubených kol velkých modulů a průměrů s přímými, šikmými nebo šípkovými zuby.

Odvalovací obrážení kotoučovým nožem (FELLOWS) v porovnání s hřebenovým nožem dosahuje nižších přesností a vyráběná kola jsou menších modulů a průměrů. Umožňuje vyrábět vnitřní i vnější ozubení s přímými nebo šikmými zuby ve velkosériové a hromadné výrobě.

Protahování se vyznačuje drahým nástrojem a proto je vhodné do velkosériové a hromadné výroby. Umožňuje obrábění vnitřních i vnějších ozubení s přímými nebo šikmými zuby.

Ševingování se používá jako dokončovací metoda ozubení u nekalených vnějších nebo vnitřních čelních ozubených kol s přímými nebo šikmými zuby.

Broušení je nejpoužívanější dokončovací metodou pro kalená ozubená kola. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči je vhodné pro broušení vnějšího i vnitřního ozubení čelních ozubených kol, ale v porovnání s odvalovacím způsobem dosahuje nižší přesnosti. Odvalovací způsob broušení je v současné době nejrozšířenější a dosahuje spolu s lapováním největších přesností.

Lapování dosahuje přesnosti jako odvalovací broušení a kvality povrchu ještě vyšší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *American Broach & Machine* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: www.americanbroach.com
2. Cutting Tools. *Andralex* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://andralexinc.com/cutting.html>
3. *E-shop frézovacích nástrojů* [online]. 2010 [cit. 2012-05-22]. MT Nástroje. Dostupné z: <http://www.i-frezy.cz/i-frezy/eshop/11-1-Tvarove-kotoucove-frezy/48-3-Na-evolventni-ozubeni-kol/5/1069-CSN22-2510-modulova-freza-m8x20-c1>
4. Gear grinding. *Krebs & Riedel* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.krebs-riedel.com/DOC/kae-111i.pdf>
5. Gear Shaving Cutters. *ESGI Tools* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.esgtools.net/gear-shaving-cutters.htm>
6. *Gleason* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: www.gleason.com
7. *Hanro Tools Incorporation* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.hanrotools.com/>
8. HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *Příručka strojního inženýra: obecné strojí součásti*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 2000, viii, 198 s. Edice strojaře. ISBN 80-722-6202-5.
9. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část* [online]. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
10. KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
11. Konstruování strojů: Čelní soukolí se šikmými zuby. *FSI VUT Brno: Ústav konstruování* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska5_6c2.pdf
12. Konstruování strojů: Výroba ozubených kol. *FSI VUT Brno: Ústav konstruování* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska3_6c2.pdf
13. KŘÍŽ, Rudolf. *Strojnické tabulky II: Pohony*. Ostrava: Montanex, 1997, 213 s. ISBN 80-857-8051-8.
14. *Luren* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: www.luren.com.tw
15. *Made in China* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.made-in-china.com/>
16. Mechanical, Industrial and Technical Calculations [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.cz/>
17. MORAVEC, Vladimír. *Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola, teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola*. Ostrava: Montanex, 2001, 291 s. ISBN 80-722-5051-5.

18. MRKVICA, Ivan. *Současné trendy v obrábění ozubených kol* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.346.vsb.cz/Mrkvica%20-%20Sou%C4%8Dasn%C3%A9%20trendy%20v%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20ozuben%C3%BDch%20kol.pdf>
19. MRKVICA, Ivan. *Speciální technologie: výroba ozubených kol I.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 92 s. ISBN 978-80-248-1931-0.
20. MRKVICA, Ivan. *Speciální technologie: výroba ozubených kol II.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, vi, 116 s. ISBN 978-80-248-2134-4.
21. *My Yellow Coat* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.myyellowcoat.com/tooling-solutions/gear-cutter-innovations/>
22. Ozubené převody. *SPSS Olomouc* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.spssol.cz/~vyuka/PREDMETY/SPS/ozubene_prevody.pdf
23. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
24. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3.* 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-718-3337-1.
25. *Shaoguan Tools Plant* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://sgtools.win.mofcom.gov.cn/en/plate01/product.asp?id=46403>
26. *Stroje na výrobu ozubení* [online]. Technická univerzita v Košiciach: Strojnícká fakulta [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/kvtar/1/files/15_Stroje_na_Vyrobu_Ozubení.pdf
27. *Technologie obrábění: 3. díl.* Praha: ČVUT, 2000, 79 s. ISBN 80-010-2091-6.
28. *Technologie II 2. díl.* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
29. The Antikythera Mechanism. *Asymptotia* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://asymptotia.com/2006/11/30/the-antikythera-mechanism/>
30. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 104 s. ISBN 978-80-248-0671-62.
31. Tolerované rozměry - kontrolní míry. *Ozubení* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.ozubeni.cz/ozubeni/mereni.html>
32. TOS a.s. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: www.tosas.cz
33. VAŇÁK, Antonín. *Technologie frézování* [online]. Šumperk, 2007 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.sossou-spk.cz/esf/TEC_fr.pdf
34. Verzahnen. *OTTO BALZ* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.ottobalz.de/verzahnen.php>
35. VOLEK, František. *Základy konstruování a části strojů I.* Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 167 s. ISBN 978-80-7318-654-8.
36. *Výroba ozubených kol* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://sosi.cz/servis-a-opravy-cviceni/vyroba-ozubenych-kol.pdf>

37. *Wenzel Gear Tec* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.wenzel-geartec.com/index.php/wgt-600.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
RO	[-]	rychlořezná ocel
SK	[-]	slinutý karbid

Symbol	Jednotka	Popis
M	[mm]	rozměr přes válečky vnitřního ozubení
M _v	[mm]	rozměr přes válečky vnějšího ozubení
R _s	[mm]	poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku
W	[mm]	rozměr přes zuby
a	[mm]	osová vzdálenost
d	[mm]	průměr roztečné kružnice
d _a	[mm]	průměr hlavové kružnice
d _b	[mm]	průměr základní kružnice
d _f	[mm]	průměr patní kružnice
d _v	[mm]	průměr válečku nebo kuličky
e	[mm]	šířka zubové mezery
h	[mm]	výška zubu
h _a	[mm]	výška hlavy zubu
h _f	[mm]	výška paty zubu
h _k	[mm]	konstantní hloubka zubu
i	[-]	převodový poměr
m	[mm]	modul
n _k	[min ⁻¹]	otáčky obráběného kola
n _f	[min ⁻¹]	otáčky odvalovací frézy
p	[mm]	rozteč
s	[min ⁻¹]	tloušťka zubu
s _k	[mm]	konstantní tloušťka zubu
x, x ₁ , x ₂	[-]	součinitelé posunutí
z'	[-]	počet zubů, přes které se měří

z, z_1, z_2	[-]	počet zubů měřeného kola
z_f	[-]	počet chodů odvalovací frézy
z_k	[-]	počet zubů obráběného kola (frézování)
z_{min}	[-]	minimální počet zubů
z_n	[-]	počet zubů nástroje (obrážení)
z_o	[-]	počet zubů vyráběného kola (obrážení)
v_c	$[m \cdot min^{-1}]$	rychlost otáčení ševingovacího kola
v_n	$[m \cdot min^{-1}]$	rychlost ševingování
v_o	$[m \cdot min^{-1}]$	rychlost otáčení obrobku
α	$[^\circ]$	úhel záběru
β	$[^\circ]$	úhel sklonu boční křivky zubu
β_b	$[^\circ]$	úhel sklonu boční křivky zubu na zákl. válci
β_n	$[^\circ]$	úhel sklonu zubů ševingovacího kola
γ	$[^\circ]$	úhel zkřížení os
δ	$[^\circ]$	úhel posuvu
η	[%]	účinnost
ω_n	$[rad \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost nástroje
ω_o	$[rad \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost vyráběného ozubení